

Dr.-Ing. Jörg Kahlert

Crashkurs Regelungs- technik

Eine praxisorientierte Einführung
mit Begleitsoftware

3., durchgesehene Auflage

VDE VERLAG GMBH

Inhalt

1	Einführung	15
1.1	Aufgaben der Regelungstechnik	15
1.2	Steuern oder Regeln?	15
1.3	Regelkreise im Wirkungsplan	20
1.4	Festwert- und Folgeregelung	21
1.4.1	Festwertregelung	22
1.4.2	Folgeregelung	23
1.4.3	Zeitgeführte Regelung	24
1.5	Mehrgrößenregelung	25
1.6	Elemente und Größen des Regelkreises	26
2	Die Regelstrecke	29
2.1	Regelstrecken mit und ohne Ausgleich	29
2.2	Statisches Verhalten der Regelstrecke	30
2.3	Dynamisches Verhalten der Regelstrecke	34
2.3.1	Proportional-Glied (P-Glied)	40
2.3.2	P-T ₁ -Glied (Verzögerungsglied 1. Ordnung)	44
2.3.3	P-T ₂ -Glied (Verzögerungsglied 2. Ordnung)	51
2.3.4	P-T ₂ S-Glied	55
2.3.5	P-T _n -Glied (Verzögerungsglied <i>n</i> -ter Ordnung)	61
2.3.6	Totzeitglied (P-T ₁ -Glied)	63
2.3.7	Regelbarkeit	64
2.3.8	Integrier-Glied (I-Glied)	66
2.3.9	I-T ₁ -Glied	68
2.3.10	Weitere Übertragungsglieder ohne Ausgleich	69
2.3.11	Doppelt-integrierende Regelstrecken	73
2.3.12	Zeit-Kennwerte gebräuchlicher Regelstrecken	76
2.4	Experimentelle Ermittlung von Strecken-Kenngrößen aus der Sprungantwort	76
2.4.1	Verfahren nach <i>Küpfmüller</i>	77
2.4.2	Verfahren nach <i>Strejc</i>	77
2.4.3	Verfahren nach <i>Naslin</i>	81
2.4.4	Verfahren nach <i>Ormanns</i>	85
2.4.5	Wendetangentenverfahren	87

2.4.6	Verfahren der Zeitprozentkennwerte	90
2.4.7	Verfahren nach <i>Thal-Larsen</i>	92
2.4.8	Identifikation von Regelstrecken ohne Ausgleich	97
3	Regelungen mit PID-Reglern	99
3.1	Typen von Reglern	99
3.2	Der Proportional-Regler (P-Regler)	99
3.3	Der Integral-Regler (I-Regler).....	112
3.4	Der Proportional-Integral-Regler (PI-Regler)	115
3.5	Der Proportional-Integral-Differential-Regler (PID-Regler).....	122
3.6	Der Proportional-Differential-Regler (PD-Regler).....	124
3.7	PID-T ₁ - und PD-T ₁ -Regler	126
3.8	Anti-Windup-Maßnahmen.....	127
4	Entwurf von PID-Reglern	129
4.1	Anforderungen an den Regelkreis	129
4.1.1	Führungs- und Störverhalten	129
4.1.2	Generelle Anforderungen an eine Regelung.....	131
4.1.3	Gütekriterien für das Führungsverhalten	132
4.1.4	Gütekriterien für das Störverhalten	133
4.1.5	Problem der bleibenden Regeldifferenz	134
4.2	Geeignete Regler-Strecken-Kombinationen	134
4.3	PID-Entwurf nach <i>Ziegler/Nichols</i>	135
4.3.1	Verfahren des Stabilitätsrands (Schwingversuch)	135
4.3.2	Verfahren der Sprungantwort-Analyse.....	137
4.4	Einstellregeln nach <i>Chien, Hrones und Reswick</i>	139
4.4.1	Einstellregeln für Strecken mit Ausgleich	139
4.4.2	Einstellregeln für Strecken ohne Ausgleich	143
4.5	Einstellregeln nach <i>Oppelt</i>	146
4.6	PID-Entwurf nach der T-Summen-Regel	148
4.7	PID-Entwurf nach dem Betragsoptimum	150
4.8	Numerische Optimierung von Reglern	153
4.9	Selbsteinstellende und adaptive Regler	156
5	Regelungen mit un stetigen Reglern	159
5.1	Unstetige Regler ohne Rückführung	159
5.1.1	Zweipunkt-Regler ohne Hysterese	159
5.1.2	Zweipunkt-Regler mit Hysterese.....	160
5.1.3	Dreipunkt-Regler.....	172
5.2	Unstetige Regler mit Rückführung	176
5.2.1	Zweipunkt-Regler mit verzögerter Rückführung	176
5.2.2	Zweipunkt-Regler mit verzögert nachgebender Rückführung.....	179
5.2.3	Dreipunkt-Regler mit verzögerter Rückführung (Schrittregler)	182

6	Vermaschte Regelkreise	185
6.1	Störgrößenaufschaltung.....	185
6.2	Hilfsgrößenaufschaltung	188
6.3	Unterlagerte Regelung (Kaskadenregelung)	189
7	Digitale Regelung	193
7.1	Prinzip der digitalen Regelung.....	193
7.2	Der digitale PID-Regler	195
7.3	Einstellregeln für digitale PID-Regler.....	200
8	Reglerentwurf im Frequenzbereich	205
8.1	Frequenzgang linearer Systeme	205
8.2	Grafische Darstellung des Frequenzgangs	210
8.3	Frequenzgang regelungstechnischer Grundglieder	212
8.3.1	P-Glied	212
8.3.2	P-T ₁ -Glied	214
8.3.3	P-T ₂ S-Glied.....	217
8.3.4	Totzeitglied	220
8.3.5	I-Glied	222
8.3.6	D-Glied	224
8.4	Frequenzgang von Reihenschaltungen.....	226
8.5	Frequenzgang des PID-Reglers.....	230
8.6	Stabilität von Regelkreisen	236
8.7	Reglerentwurf.....	242
8.7.1	Phasen- und Amplitudenreserve.....	242
8.7.2	PI-Regler	248
8.7.3	PID-Regler	250
8.7.4	PD-Regler	252
9	Unschärfe Regelung (Fuzzy Control)	255
9.1	Der Mensch als Regler.....	255
9.2	Grundlagen der Fuzzy-Logik	257
9.2.1	Fuzzy-Mengen	257
9.2.2	Linguistische Variablen und Terme	259
9.2.3	Fuzzy-Inferenz	260
9.2.4	Defuzzifizierung.....	263
9.2.5	Fuzzy-Inferenz bei mehreren Eingangsgrößen.....	265
9.3	Fuzzy Controller	269
9.4	Hybride und adaptive Fuzzy-Regelungssysteme.....	273
9.4.1	Nichtadaptive Systeme mit konventionellem Regler	274
9.4.2	Umschaltregelungen mit Fuzzy-Komponente.....	278
9.4.3	Adaptive Konzepte.....	279
10	Realisierung von Reglern	285
10.1	Analogregler auf Basis von Operationsverstärkern.....	285

10.1.1	Elektronischer P-Regler.....	286
10.1.2	Elektronischer I-Regler	288
10.1.3	Elektronischer PI-Regler	288
10.1.4	Elektronischer PD-Regler.....	289
10.1.5	Elektronischer PID-Regler	289
10.2	Digitalregler.....	290
10.3	SPS-Regler	291
10.4	Schaltende Regler.....	293

11 Begleit-Software zum Buch 295

11.1	Installation der Software.....	295
11.2	Programmmodule von WINFACT 7	296
11.3	Das blockorientierte Simulationssystem BORIS.....	297
11.3.1	Übersicht	297
11.3.2	Komponenten des BORIS-Hauptfensters	298
11.3.3	Aufbau der Simulationsstruktur.....	299
11.3.4	Steuerung der Simulation	300
11.3.5	Ermittlung von Frequenzgängen	301
11.4	Ermittlung von Frequenzgängen mit LISA	303
11.4.1	Übersicht	303
11.4.2	Einlesen der Daten.....	303
11.4.3	Darstellungsform und Speichern von Ergebnissen.....	304
11.5	Reglerentwurf im Frequenzbereich mit RESY	306
11.5.1	Übersicht	306
11.5.2	Bildschirmaufbau	308
11.5.3	Konfigurierung des Regelkreises.....	309
11.6	Entwurf und Analyse von Fuzzy-Systemen mit FLOP.....	309
11.6.1	Übersicht	309
11.6.2	Linguistische Variablen.....	311
11.6.3	Regelbasis.....	311
11.6.4	Systemanalyse im Debug-Modus	312

12 Anwendungsbeispiel: Drehzahlregelung eines Gleichstromantriebs 315

12.1	Vorstellung der Regelstrecke.....	315
12.1.1	Modellierung des Motors	316
12.1.2	Modellierung des Stromrichters	317
12.1.3	Modellierung des Tachogenerators.....	318
12.1.4	Gesamtstruktur der Regelstrecke.....	318
12.1.5	Sprungantwort und Frequenzgang der Regelstrecke	320
12.2	Reglerentwurf im Zeitbereich.....	322
12.2.1	Schwingversuch nach <i>Ziegler/Nichols</i>	322
12.2.2	Einstellregeln nach <i>Chien, Hrones</i> und <i>Reswick</i>	324
12.2.3	Reglerentwurf nach der T-Summen-Regel.....	327
12.2.4	Reglerentwurf nach dem Betragsoptimum	328
12.2.5	Numerische Optimierung anhand des IAE-Kriteriums.....	329

12.2.6	Zweipunkt-Regelung der Gleichstrommaschine	331
12.3	Reglerentwurf im Frequenzbereich	332
12.3.1	Stabilitätsanalyse.....	332
12.3.2	Entwurf eines PI-Kompensationsreglers	334
12.4	Vergleich der Entwurfsergebnisse	336
Formelzeichen und Benennungen Deutsch - Englisch		339
Literatur		345
Stichwortverzeichnis		347